

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Запорізький національний технічний університет

Конспект лекцій  
з дисципліни «Паяння металів»,  
для студентів освітньої програми „Технології та устаткування  
зварювання” всіх форм навчання

2016

Конспект лекцій з дисципліни «Паяння металів» для студентів освітньої програми „Технології та устаткування зварювання” всіх форм навчання / Укл.: О.Є. Капустян, С.П. Бережний - Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 – 50 с.

Укладач: О.Є. Капустян, ст. викладач,  
С.П. Бережний, канд. техн. наук, доцент  
Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент  
Редактор: І.П. Аверченко  
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено  
на засіданні кафедри ОТЗВ  
Протокол № 8 від 1.06.2016

Рекомендовано до видання  
НМК ІФФ  
Протокол № 10 від 21.06.2016

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 СУТЬ І РІЗНОВИДНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПАЯННЯ.....	5
2 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ ПАЯННЯ З РІЗНИМ ФОРМУВАННЯМ ПАЯНОГО ШВА.....	8
2.1 Паяння готовим припоєм. Капілярне паяння.....	8
2.2 Некапілярне паяння.....	10
2.3 Контактно-реактивне паяння.....	11
2.4 Реактивно-флюсове паяння.....	12
2.5 Композиційне паяння.....	13
2.6 Дифузійне паяння.....	13
3 СПОСОБИ ВИДАЛЕННЯ ОКСИДНОЇ ПЛІВКИ В ПРОЦЕСІ ПАЯННЯ.....	14
3.1 Флюси для паяння.....	15
3.1.1 Основні типи флюсів.....	15
3.1.2 Флюси для високотемпературного паяння.....	17
3.1.3 Флюси для низькотемпературного паяння.....	18
3.1.4 Дозування флюсу при паянні.....	19
3.2 Газові середовища для паяння.....	20
4 ПРИПОЇ ДЛЯ ПАЯННЯ.....	21
4.1 Мідні припої.....	21
4.2 Срібні і золоті припої.....	23
4.3 Нікелеві припої.....	23
4.4 Алюмінієві припої.....	24
4.5 Олов'яно-свинцеві припої.....	24
4.6 Індієві припої.....	25
4.7 Цинкові припої.....	25
4.8 Титанові припої.....	25
5 КОНСТРУЮВАННЯ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ І ВИРОБІВ.....	26
5.1 Типи паяних з'єднань.....	26
5.2 Особливості конструювання паяних з'єднань.....	28
5.3 Міцність паяних з'єднань.....	29
6 ТЕХНОЛОГІЯ ПАЯННЯ І ОБЛАДНАННЯ.....	30
6.1 Технологія паяння.....	30
6.2 Техніка процесу паяння і обладнання для його здійснення.....	33
6.2.1 Паяння паяльником.....	33

6.2.2	Паяння нагрівальними штампами, блоками, матами .....	34
6.2.3	Газополуменеве паяння.....	35
6.2.4	Паяння газовим теплоносієм.....	35
6.2.5	Паяння в печах.....	35
6.2.6	Індукційне паяння .....	37
6.2.7	Паяння занурюванням.....	37
6.2.8	Паяння світловим і інфрачервоним випромінюванням.....	38
6.2.9	Паяння лазерним променем .....	39
6.2.10	Паяння опором.....	40
7	ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПАЯННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	40
7.1	Паяння міді і її сплавів.....	40
7.2	Паяння сталей .....	41
7.2.1	Паяння низьковуглецевих і низьколегованих сталей.....	41
7.2.2	Паяння високолегованих (нержавіючих) конструкційних сталей .....	42
7.2.3	Паяння жароміцних сталей і сплавів .....	43
7.2.4	Паяння інструментальних сталей .....	44
7.3	Паяння чавуну.....	44
7.4	Паяння нікелю і його сплавів .....	44
7.5	Паяння титану.....	45
7.6	Паяння алюмінію .....	46
7.7	Паяння металокерамічних твердих сплавів .....	47
7.8	Паяння металів з неметалами .....	47
8	ДЕФЕКТИ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ І ВИРОБІВ .....	49
	ВИСНОВКИ.....	50

## ВСТУП

Паяння - є одним з найбільш стародавніх способів з'єднання металів. Археологічні розкопки свідчать, що людство досконало володіло цим процесом більше 5 тисяч років тому. Однак до середини минулого століття цей процес був ремеслом, що мало обмежене використання.

Після Другої світової війни почався бурхливий період розвитку паяння, обумовлений прогресом в атомній, ракетній, радіоелектронній та інших галузях техніки. Було розроблено багато нових способів паяння і засобів для їх здійснення.

Істотною перевагою з'єднання металів методами паяння є:

- можливість з'єднання за один цикл великої кількості заготовок;
- можливість з'єднання різнорідних матеріалів, навіть тих, які не можна між собою зварити;
- менша величина внутрішніх напружень й деформацій у готових виробах;
- отримання прецизійних з'єднань.

Позитивною стороною паяння є те, що паяні з'єднання можна зробити роз'ємними і виконати процес повторно.

Тому цей технологічний процес знаходить все більше розповсюдження, розробляються засоби його механізації і автоматизації, нові способи паяння і матеріали для їх здійснення.

## 1 СУТЬ І РІЗНОВИДНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПАЯННЯ

Паяння - це процес з'єднання металів у твердому стані за допомогою металевих припоїв, які при розплавленні змочують поверхні з'єднуваних деталей, заповнюють капілярний зазор між ними і після кристалізації утворюють міцне з'єднання за рахунок міжмолекулярних сил. Процес паяння здійснюється при температурах, нижчих від температури плавлення з'єднуваних металів.

Утворення паяного з'єднання супроводжується процесами

активації поверхонь з'єднаних матеріалів, переходу припою в рідкий або твердо-рідкий стан, змочування і розтікання припою по поверхнях виробу, а також взаємодія з ними, в результаті чого відбувається зміна властивостей поверхневих шарів паяних матеріалів і утворення нових фаз.

В паяному з'єднанні розглядають наступні ділянки :паяний шов (зона сплавлення) – це частина паяного з'єднання з литою структурою, що закристалізувалася у процесі паяння. Неоднорідний за складом і будовою прошарок між двома деталями, що з'єднуються.

Галтель – частина паяного шва, що утворилася з краю зазору на зовнішніх поверхнях деталей що з'єднуються під дією капілярних сил.

Спай – перехідний шар на границі шов – деталь. Складається з дифузійної зони і прикристалізованого шару, який утворюється в результаті виділення з розплаву більш тугоплавкої складової.

Дифузійна зона – частина основного металу, яка граничить зі спаєм. Має змінений хімічний склад, мікроструктуру та властивості. Утворюється за рахунок дифузії компонентів припою і матеріалу, який паяють. Її може і не бути.

Зона термічного впливу – ділянка паяного з'єднання, що включає і дифузійну зону, яка характеризується зміненою структурою та властивостями матеріалу при локальному нагріванні. Її також може і не бути, наприклад при пічному паянні, коли нагрівається увесь виріб. В залежності від методів введення припою і особливостей формування паяного шва, способу активації поверхонь і варіантів їх нагрівання існує велика різноманітність способів паяння.

Стандартами передбачена класифікація всіх способів паяння (СП) за наступними технологічними ознаками:

- формування паяного шву (СП1);
- видалення окисних плівок (СП2);
- способу нагрівання (СП3);
- наявності тиску на з'єднувані деталі (СП4).

Класифікаційними різновидами першої групи способів паяння є:

- метод отримання припою;
- спосіб заповнення паяльного зазору припоєм;
- умови кристалізації паяного шву.

В залежності від способу отримання припою розрізняють:

- паяння готовим припоєм;

- композиційне паяння;
- контактнo-реактивне;
- реактивно-флюсове;
- контактнo-твердогазове.

В залежності від особливостей заповнення зазору припоєм є капілярне і некапілярне паяння.

З точки зору особливостей кристалізації паяного шва розрізняють дифузійне паяння і з кристалізацією при охолодженні.

В залежності від способів видалення окисної плівки існують наступні різновидності способів паяння:

- флюсове;
- ультразвукове;
- в активному газовому середовищі;
- в нейтральному газовому середовищі;
- у вакуумі.

В залежності від методу нагрівання виробів розрізняють наступні способи:

- паяльником;
- нагрітими штампамі;
- нагрівальними ковдрами (матами) зануренням в розплав солей;
- зануренням в розплавлений припій;
- хвилею припою;
- в печі;
- газополуменеве;
- світловими променями;
- інфрачервоне; лазерне;
- електронно-променеве;
- індукційне;
- дугове та ін.

І в залежності від наявності тиску на паяні вироби розрізняють паяння під тиском і без тиску. В повній назві способу паяння повинні бути обумовлені всі ознаки. Наприклад, паяння розплавленим припоєм, флюсове, в печі без тиску.

## 2 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ ПАЯННЯ З РІЗНИМ ФОРМУВАННЯМ ПАЯНОГО ШВА

### 2.1 Паяння готовим припоєм. Капілярне паяння

При даному способі для утворення з'єднання використовують готовий металевий припій, який подають в зону паяння в розплавленому виді або в твердому стані з наступним розплавленням в процесі паяння.

В залежності від форми і розмірів конструктивних елементів з'єднання розплавлений припій може формувати валик і заповнювати зазори між з'єднуваними поверхнями. Невеликі за величиною зазори можуть заповнюватись за рахунок капілярних сил, більші - за рахунок сил гравітації, вакууму, надлишкового тиску, електромагнітних сил та ін.

Для того, щоб відбувалось добре формування паяних швів і якісне заповнення зазорів, припій повинен змочувати паяні поверхні і розтікатися по них при температурах паяння.

Під змочуванням розуміють такий спосіб контактної взаємодії між твердою і рідкою речовинами, при якому міцність зв'язку їх часток більша у порівнянні зі зв'язком між елементарними частками у рідині. Зв'язок між припоєм і поверхнею металу здійснюється за рахунок сил адгезії (адсорбції) або когезії.

Адгезія (адсорбція) - взаємодія між речовинами без обміну частками по місцю фізичного контакту. Адгезія буває фізична – за рахунок дипольної будови молекул без обміну електронами і хімічна (хемобсорбція), яка супроводжується обміном електронів між взаємодіючими частками.

Когезія - це взаємодія двох речовин, що супроводжується обміном елементарними частками, процесами дифузії і утворення нових речовин за рахунок протікання хімічних реакцій.

Можливість змочування рідиною твердого тіла в рівноважних умовах визначається співвідношенням міжфазних поверхневих натягів:

- між твердою і рідкою фазами ( $\sigma_{тр}$ );
- між рідкою і газоподібною фазами ( $\sigma_{рг}$ );



– між твердою і газоподібною фазами ( $\sigma_{\text{тг}}$ ).

Робота адгезії (адсорбції) або енергія зв'язку між твердою і рідкою фазами після їх контакту дорівнює:

$$W_a = \sigma_{\text{тг}} + \sigma_{\text{рг}} - \sigma_{\text{тг}}.$$

Чим більше енергія зв'язку між припоєм і поверхнею металу, тим ліпша змочуваність і краще розтікання припою. Оцінити ці характеристики можна експериментально по величині контактного кута змочування  $\Theta$  (рис. 2.1)

$$W_a = \sigma_{\text{рг}}(1 + \cos\Theta).$$

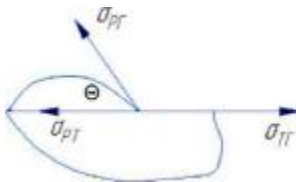


Рисунок 2.1 - Рівновага краплі припою на поверхні твердого тіла

На процеси адсорбційного змочування і розтікання припою істотно впливає рельєф поверхні (нааявність рисок, канавок), бо у цьому разі мають вплив капілярні явища.

При розташуванні розплавленого припою в капілярному зазорі на нього діє капілярна сила:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{\text{рл}} \cos\Theta}{n},$$

де  $n$  - ширина зазору.

Якщо припій змочує метал ( $\Theta < 90^\circ$ ), то тиск позитивний ( $\Theta > 0$ ) і сприяє затіканню припою в зазор. При відсутності змочування ( $\Theta > 90^\circ$ )  $\Delta P$  - від'ємна і припій витісняється із зазору навіть якщо він заздалегідь туди був примусово введений (наприклад, у виді фольги).

Висота підйому припою  $l$  у вертикальному капілярному зазорі залежить від капілярного тиску і тиску стовпа рідини і визначається із співвідношення:

$$l = \frac{2s_{pc} \cos \Theta}{r \cdot g \cdot n}$$

де  $\rho$  - густина рідини;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

При капілярному паянні розплавлений припій заповнює зазор і утримується в ньому під дією капілярних сил. Це найпоширеніший спосіб паяння. Важливими є розміри капілярного зазору: великі зазори 0,2-0,7 мм; номінальні 0,05 – 0,2 мм; малі – менші за 0,05 мм.

В реальних умовах через зміну властивостей припою в результаті процесів дифузії величина підйому припою відрізняється від розрахункової.

## 2.2 Некапілярне паяння

При цьому способі паяння підготовка кромки і техніка виконання процесу подібна до зварювання, однак відсутнє розплавлення основного матеріалу. Часом цей процес називають паяння - зварювання.

Переважно для його здійснення використовують газове полум'я, рідше електродуговий нагрів. Цим способом паяють чавуни, мідь та її сплави, сталі з використанням латуней і інших припоїв. Можна отримувати також з'єднання за рахунок розплавлення більш легкоплавкого матеріалу при паянні різнорідних металів.

Більш легкоплавкий розплавляється і змочує поверхню тугоплавкого матеріалу з утворенням галтелей.

Існують також комбіновані способи отримання з'єднань - корінь шва зварюють дуговим способом, а верхній шов паяють, що дає можливість отримати кращий зовнішній вид і герметичність з'єднань.

### 2.3 Контактно-реактивне паяння

Контактно-реактивним називають такий вид капілярного паяння, при якому припій утворюється в результаті контактнo-реактивного плавлення з'єднуваних матеріалів, що утворюють легкоплавкі евтектики або сполуки.

До матеріалів, що утворюють легкоплавкі евтектики і розчини відносяться такі поєднання: Au - Si, Al - Si, Al - Zn, Ag - Cu, Sn - Bi та ін. До композицій з легкоплавкими хімічними з'єднаннями відносяться: Pb - Bi, An - Sb, Cu - B, Cu - P, Fe - C, Fe - Zn, Fe - Si, Fe- Ti, Cu - Ti, Al - Ni, Cu - Ti, Ni - Ti та ін.

Явище контактнo-реактивного плавлення настає при нагріванні контактуючих речовин до  $t^{\circ}$  на 1...3° С вище від температури плавлення найбільш легкоплавкої сполуки чи евтектики, що може утворюватись між контактуючими матеріалами. В цьому випадку утворення рідкої фази відбувається за 1...2 с.

Висока змочуюча здатність рідкої фази, що утворюється, дозволяє здійснювати контактнo-реактивне паяння багатьох матеріалів без застосування флюсів.

Процес контактнo-реактивного плавлення може відбуватися в двох режимах: стаціонарному і нестаціонарному.

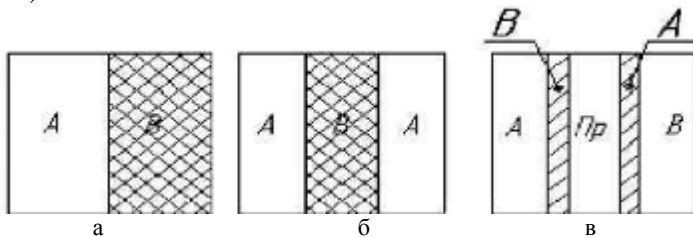
При стаціонарному режимі під дією тиску на поверхні відбувається безперервне видалення надлишку рідкої фази і товщина рідкого прошарку залишається постійною.

При нестаціонарному режимі товщина рідкого прошарку з часом зростає в результаті розчинення контактуючих речовин в рідкій фазі.

Введення в контактуючі метали інших компонентів може прискорювати або сповільнювати процес контактнo-реактивного плавлення, в залежності від того, утворенню яких евтектик сприяють ці елементи (легкоплавких чи тугоплавких) (рис. 2.2).

Для запобігання ерозії тонкостінних виробів зменшити кількість рідкої фази, що утворюється, можна шляхом видалення частини евтектики із зазору за допомогою тиску, зменшенням товщини прошарку «В» (рис. 2.2 б), використанням буферних прошарків із неактивних металів. Збільшення рідкої фази, що утворюється можливо шляхом підвищення температури вище евтектичної чи додаванням припоїв, на поверхню яких нанесені прошарки речовин, що паяються

(рис. 2.2 в).



а) паяння матеріалів А+В; б) паяння матеріалу А+А через прошарок В; в) паяння матеріалів А + В з використанням припою, покритого шарами матеріалу В і А  
Рисунок 2.2 - Схеми контактнo-реактивного паяння

#### 2.4 Реактивно-флюсове паяння

Реактивно-флюсовим називають такий спосіб паяння, при якому шар припою утворюється за рахунок відновлення металу з компонентів флюсу в процесі їх дисоціації, або в результаті витіснення з них металу при взаємодії з паяними матеріалами.

Такі флюси можуть додатково мати компоненти, що утворюють газовий захист шва від окислення.

Активация паяних поверхонь здійснюється як компонентами флюсу, так і (переважно) рідким припоєм, що утворюється. Необхідними компонентами реактивних флюсів є галогеніди металів.

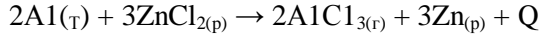
Можливість протікання реакції відновлення металу з солей розплавленого флюсу визначається активністю металів в цих умовах, що, в свою чергу, залежить від типу розплаву і його температури.

Для розплавів на основі NaF ряд активності має вид: Mn, Zn, Al, Cd, Fe, Pb, Co, Ni, Bi, Zr, Cu.

Для розплавів на основі NaCl є такий ряд: Cr, Mg, Be, Mn, Al, Zn, Cd, Pb, Sn, Ni.

В цих рядах кожен метал здатний витіснити з солей метал, розташований справа від нього. Щоб витіснений з солей метал міг стати припоєм треба, щоб температура його плавлення була нижчою температури паяння.

Для деяких матеріалів процеси взаємодії металу з флюсом протікають екзотермічно, наприклад:

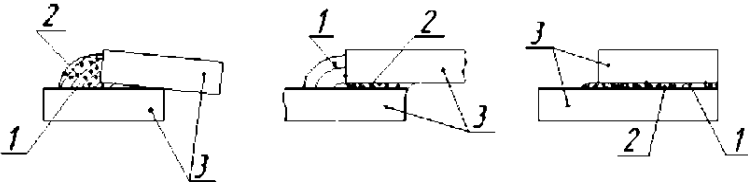


Це тепло сприяє протіканню процесів паяння і навіть зварювання. Реактивно-флюсовий спосіб найбільш широко використовують для паяння алюмінію. Рідше - для сталей і мідних сплавів.

## 2.5 Композиційне паяння

Композиційне паяння здійснюється з використанням припоїв, які складаються з наповнювача і легкоплавкої складової. Такі припої називаються композиційними. Температура плавлення наповнювача вище температури паяння. Наповнювач може бути у виді порошку, гранул або волокон. Використовується також паяння армованими припоями, в яких за наповнювач служить сітка, спечена губка і ін.

Композиційне паяння використовують для з'єднання деталей з некапілярними або нерівномірними зазорами. В цьому випадку наповнювач припою утворює систему капілярів, яка керує розтіканням рідкої фази і утримує розплав в зазорі. Можливі сполучення легкоплавкої складової і наповнювача приведені на рис. 2.3.



1 - припій, 2 - наповнювач, 3 - деталі

Рисунок 2.3 - Компонівка припою і наповнювача при композиційному паянні

## 2.6 Дифузійне паяння

Дифузійним паянням називають процес, при якому затвердіння паяного шва відбувається в процесі ізотермічної кристалізації при температурах вище  $t^{\circ}$  солідусу припою. Такий процес може

розвиватися тільки за умови відведення легкоплавкої основи припою зі шва. Відведення може відбуватися в результаті їх дифузії в паяний матеріал, випаровування, зв'язування їх в тугоплавкі з'єднання і ін.

Необхідно відрізнити дифузійне паяння від дифузійної термообробки паяних з'єднань з метою збільшення температури розпаювання за рахунок дифузії елементів зі шва в метал, гомогенізації шва або зменшення внутрішніх напружень.

Дифузійне паяння може здійснюватись різними припоями (готовими, контактнo-реактивними і ін.).

Найбільш широко використовується дифузійне паяння з відводом компонентів депресантів зі шва в паяний метал. Важливою умовою здійснення такого процесу паяння є існування при температурах паяння досить широкої ділянки твердих розчинів легкоплавкої основи припою в паяному металі. З витримкою при  $t^\circ$  паяння росте концентрація паяного металу і підвищується температура його затвердіння, через що відбувається процес ізотермічної кристалізації.

Якщо між контактуючими матеріалами утворюються інтерметаліди, то процес дифузійного паяння можливий, якщо ці інтерметаліди є змінного складу і можуть розчиняти дифундуючі елементи.

Позитивною стороною дифузійного паяння є можливість отримання якісних з'єднань з високою температурою розпаю, більшою ніж температура паяння.

Так при паянні Mo + W нікелевим припоєм  $T_{\text{паяння}} = 1525^\circ \text{C}$ , а температура експлуатації з'єднань дорівнює  $2000^\circ \text{C}$ .

### **3 СПОСОБИ ВИДАЛЕННЯ ОКСИДНОЇ ПЛІВКИ В ПРОЦЕСІ ПАЯННЯ**

Процес взаємодії паяного металу з припоєм з утворенням міжмолекулярних зв'язків може відбуватись тільки після видалення з їх поверхонь оксидних плівок.

І хоча при підготовці деталей до паяння оксидні плівки з їх поверхні усуваються, в атмосфері повітря метал знову швидко

окислюється при підвищенні  $t^\circ$ .

Для усунення оксидної плівки в процесі паяння використовують багато способів, найбільш розповсюдженим серед яких є використання флюсів, паяння у вакуумі, активних та інертних газових середовищах.

Окрім того для руйнування оксидної плівки в процесі паяння використовують різні фізико-механічні методи - абразивний, ультразвуковий, абразивно-кавітаційний.

Розглянемо особливості їх застосування.

### 3.1 Флюси для паяння

#### 3.1.1 Основні типи флюсів

Флюси при паянні призначені для захисту паяних поверхонь і припою від окислення під час нагрівання і усунення окислів, що утворюються. Вони повинні відповідати наступним вимогам:

- $T_{пл}$  флюсу нижча  $T_{пл}$  припою;
- до початку процесу плавлення припою флюс повинен змочувати поверхню основного матеріалу;
- флюс забезпечує якісне усунення окислів основного металу і припою;
- флюс не втрачає активність при тривалому нагріві;
- продукти флюсування не повинні викликати корозію з'єднання, а шлак може легко відділятися від поверхні деталей.

В залежності від типу основи флюсу і активуючих добавок, всі флюси умовно поділяються на 4 групи на основі:

- з'єднань бору;
- фтористих з'єднань;
- хлористих з'єднань;
- каніфолі і ін. органічних з'єднань.

Флюси проявляють флюсоуючу дію лише в певному інтервалі температур ( $t$  - інтервал активності флюсів). При менших температурах низька активність флюсів, при більших - вони розкладаються.

Активність флюсів є також функцією часу витримки і це необхідно враховувати при виборі режимів паяння. До складу флюсу, як правило, входять речовини, що складають його основу, розчинник оксидної плівки і активна флюсоуюча речовина, що вступає в реакцію з

окислами. Ці функції можуть поєднуватись в одній речовині, або частіше застосовуються багатокомпонентні флюси.

Флюси використовуються у виді твердих, порошкоподібних, рідких, пастоподібних і газоподібних речовин.

У багатокомпонентних флюсах для високотемпературного паяння за основу частіше беруть стійкі при нагріванні солі або систему солей:  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ;  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-B}_2\text{O}_3$ ;  $\text{KCl-NaCl}$ ,  $\text{NaCl-BaCl}_2$  і ін.

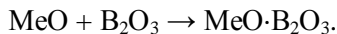
Здатністю розчиняти оксиди відзначаються фториди лужних і лужноземельних металів:  $\text{LiF}$ ,  $\text{KF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ .

Однак процес розчинення оксидів є довгим і неповним. Тому у флюси входять спеціальні активні речовини, які при температурах паяння вступають в реакцію з оксидами з утворенням легкоплавких речовин. В якості таких речовин використовують солі важких металів ( $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ); металічну лігатуру, або деякі оксиди ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ).

Оксид бору утворюється і при використанні тетраборату натрію (бури). При нагріванні бура розкладається:



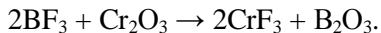
а борний ангідрид вступає в реакцію з окислами, утворюючи легкоплавкі комплекси



При паянні сталей утворюються борати:  $2\text{FeO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$ .

При паянні міді і латуней:  $\text{CuO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CuO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ .

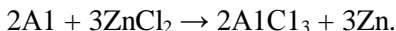
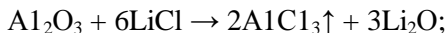
Високу активність боридним флюсам надають добавки фторборатів ( $\text{KBF}_4$ ,  $\text{NaBF}_4$ ), які при нагріванні розкладаються з виділенням трифтористого бору ( $\text{KBF}_4 \rightarrow \text{KF} + \text{BF}_3$ ), який вступає в реакцію з окислами



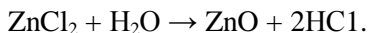
Борний ангідрид, який виділився, також реагує з оксидами.

При паянні Al використовують флюси з добавками хлоридів, які вступають в реакцію з оксидом алюмінію, або з металом і цим механічно руйнують плівку:

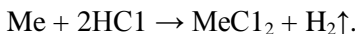
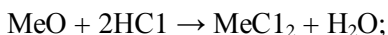




Для низькотемпературного паяння металів застосовують в якості флюсу водні розчини  $\text{ZnCl}_2$ , який, гідролізуючись, утворює соляну кислоту:



Кислота реагує з оксидами і металом:



В якості активатора використовують і хлорид амонію в твердому стані  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , або евтектику  $\text{ZnCl}_2\text{-NH}_4\text{Cl}$  з  $t_{\text{пл}} < 200^\circ \text{C}$ , а також інші речовини: солянокислий анілін, анілін - фосфат, ортофосфорну кислоту, гідрозін ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) і його солі та ін.

Для низькотемпературного паяння  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$  широко застосовують каніфоль, в якій активатором є абієтинова кислота  $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$  ( $t_{\text{пл}} = 173^\circ \text{C}$ ,  $t_{\text{розпл}} = 300^\circ \text{C}$ ). Каніфоль розчиняється тільки в неполярних рідинах (етиловий спирт). Підвищену активність має спиртовий розчин каніфолі з 0,5 % хлоридів важких металів.

### 3.1.2 Флюси для високотемпературного паяння

Для високотемпературного ( $> 800^\circ \text{C}$ ) паяння вуглецевих сталей, чавунів, міді та її сплавів мідними і срібними припоями в якості флюсів застосовують переважно буру; буру і борну кислоту; буру і борну кислоту з добавками фтористого кальцію (ПВ 200, ПВ 201, ПВ-18В), фторобората калію (ПВ 209, ПВ 284), вуглекислих солей або хлоридів лужних металів.

Флюси з добавками фторидів використовують переважно для паяння легованих сталей (нержавіючих, жароміцних), ніхромів,

алюмінієвих бронз  $t_{\text{паяння}} < 850^{\circ} \text{C}$ .

Для паяння Al та його сплавів припоями на основі Al і Zn придатні флюси на основі хлоридів системи LiCl-KCl, NaCl-KCl з домішками хлоридів важких металів, карналіту ( $\text{MgCl}_2$ ), або фторидів лужних і лужноземельних металів (34A, Ф3, Ф5, Ф320, Ф330 та ін).

Оптимальний вміст хлоридів важких металів  $< 10\text{-}12\%$ . При більш високому вмісті  $\text{ZnCl}_2$  процеси флюсування практично не поліпшуються, але погіршується корозійна стійкість паяних з'єднань.

При додаванні кріоліту і карналіту зменшується гігроскопічність флюсів, підвищується їх термічна стійкість, що дає можливість використовувати їх для паяння в печах, зануренням та ін.

Високотемпературне флюсове паяння титану проводять рідко - переважно у вакуумі чи захисному газовому середовищі. Для флюсового паяння титану застосовують хлоридні флюси з домішками  $10\% \text{AgCl}$  і  $9\% \text{LiF}$ .

### 3.1.3 Флюси для низькотемпературного паяння

Для низькотемпературного паяння Cu і її сплавів беруть переважно  $30\%$  розчин каніфолі в етиловому спирті (флюс KE), часом з домішками хлористого цинку, солянокислого гідразину, або молочної кислоти.

Для паяння сталей використовують водні розчини хлористих солей з домішками соляної кислоти та флюси на основі каніфолі, до яких вводять ортофосфорну кислоту ( $32\%$ ); триетаноламін ( $2\%$ ), діетаноламін ( $4\%$ ) та ін.

Для низькотемпературного паяння алюмінію використовують суміш  $\text{ZnCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$ , а також флюси на основі фторборатів цинку, кадмію, алюмінію, триетаноламіну; триетаноламіну і фторборатів - Ф59А, Ф54А, Ф61А.

### 3.1.4 Дозування флюсу при паянні

Для забезпечення високої якості флюсового паяння подачу флюсів необхідно дозувати. При надлишку флюсу його залишки заважають затіканню припою в зазор, при недостатчі - погіршується процес флюсування.

Дозування порошкових флюсів здійснюють шляхом приготування сумішей флюсу з порошком або стружкою припою, у виді: припоефлюсових гранул чи таблеток; порошкових дротів та покритих флюсом стержнів припою. Дозу флюсу визначають експериментально. Як правило, в трубчатих припоях типу ПОС його вміст складає 2 - 2,5 %.

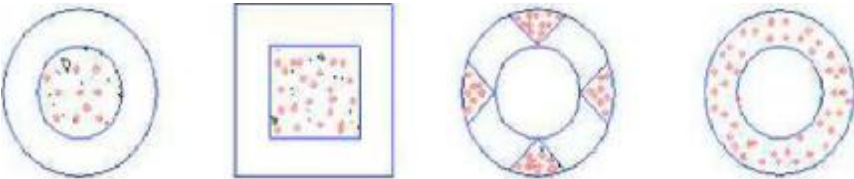


Рисунок 3.1- Форми перетину порошкових припоефлюсових дротів

Дозування флюсу зменшує його втрати, полегшує подачу в труднодоступні місця, зменшує затрати на паяння. Рідкі флюси наносять на деталь пензликом, занурюванням, розпиленням.

Для обмеження розтікання припою по поверхні виробу на його поверхню наносять покриття різного складу: пасти з пудри глинозему у суміші з оксидами, біхромат калію з водою, кремнійорганічні рідини з наповнювачами, розчини поліметилфенилоксанової смоли у толуолі, хромування та оксидування поверхні. Застосовують маски у виді плівки з епоксидного або іншого теплостійкого лаку, теплостійкої резини, еластичних пластиків та паперові одноразові маски. Обмежити розтікання припою по поверхні виробів можна також механічним шляхом – поліруванням поверхні, нанесенням канавок на шляху розтікання припою (в неї можна вкласти сплетені тонкі проволочки з матеріалу, що добре змочується припоем). Можливо зменшити кількість припою, або використовувати компоненти припою, що гірше змочують метал виробу; скорегувати режими паяння, його тривалість та склад середовища паяння шляхом зменшення кількості активного

компонента.

Видалення зайвої кількості рідкого припою можливо вібраційним струшуванням, металевими щітками та стисненим повітрям.

### 3.2 Газові середовища для паяння

Паяння в газових середовищах не має тих недоліків, що присутні при флюсовому паянні - втрати корозійної стійкості та ін. Газові середовища для паяння можна розділити на 3 типи: нейтральні; активні; вакуум.

В якості нейтральних середовищ застосовують аргон, гелій і азот. Їх роль полягає у захисті метала і припою від окислення. В хімічну взаємодію з окисними плівками вони не вступають. Видалення окисної плівки при високотемпературному нагріванні відбувається завдяки дисоціації окислів в безкисневому середовищі.

Ще в більшій мірі процес дисоціації (а також сублимації і випаровування) оксидів відбувається у вакуумі. Тому його використовують для особливо відповідальних виробів. Паяння у вакуумі забезпечує також отримання щільних швів з гарною зовнішньою поверхнею і товарним видом.

Недолік - складність і висока вартість обладнання, значна тривалість процесу.

Активні газові середовища не тільки захищають від окислення, але й вступають в реакцію з оксидами. В якості активних середовищ використовують  $H_2$ ,  $CO$  і їх суміші з азотом.

Водень більш активний відновлювач у порівнянні з  $CO$  (приблизно у 20 разів):



Наявність кисню чи водяної пари у водневому середовищі гальмує реакцію відновлення.

Робити висновки про можливість відновлення оксиду в середовищі водню можливо на підставі даних про теплоту утворення оксиду і водяної пари. Відновлення оксиду воднем можливе, якщо

теплота утворення оксиду менше теплоти утворення водяної пари. Тому сплави, що утворюють оксиди  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  не паяються у водневому середовищі. Сплави з оксидами  $Cr_2O_3$  потребують застосування сухих середовищ. Краще всього паяються маловуглецеві, швидкоріжучі і молібденові сталі. Для зменшення вибухонебезпечності - водень застосовують в суміші з азотом.

## 4 ПРИПОЇ ДЛЯ ПАЯННЯ

Матеріали, що використовуються в якості припоїв повинні відповідати наступним вимогам:

- температура їх плавлення нижча  $T_{пл}$ , паяних матеріалів;
  - припій повинен мати добру рідкотекучість і змочувати поверхню матеріалів;
  - припій утворює міцні з'єднання за рахунок адгезійно-дифузійних процесів;
  - припій не повинен негативно впливати на статичну і динамічну міцність матеріалів;
  - коефіцієнти лінійного розширення і корозійна стійкість припою і матеріалів мають бути близькими за величиною.
- Всі припої можна класифікувати за наступними ознаками:
- за хімічним складом (мідні, срібні і т.д.);
  - за технологічними властивостями: звичайні, самофлюсуючі, композиційні;
  - за температурою плавлення (низькотемпературні ( $< 450^\circ C$ ) і високотемпературні);
  - за формою (дротяні, порошкові, пруткові, пластини і трубчаті).

### 4.1 Мідні припої

Це найбільш розповсюджені припої для високотемпературного паяння. До цієї групи відносяться мідь і її сплави  $Cu - Zn$ ,  $Cu - Ni$ ,  $Cu - P$

і Cu-Mn-Ni.

Мідь ( $T_{пл} = 1083^{\circ} \text{C}$ ) має низьку пружність пари у вакуумі і тому широко використовується для високотемпературного паяння у вакуумі вуглецевих і легованих сталей. Однак при паянні в окислювальних середовищах утворюються газові пори і кристалізаційні тріщини через утворення евтектики Cu – Cu<sub>2</sub>O.

Мідно-цинкові припої ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54, Л-62, ЛОК-62-06-04 та ін. застосовують для паяння міді, сталей і чавунів при швидкому нагріванні на повітрі газовим пальником, СВЧ, в соляних ваннах. Вони мають більш низьку  $t_{пл}$  ( $825-905^{\circ} \text{C}$ ), високу корозійну стійкість, міцність і пластичність.

Паяння здійснюють з флюсами на основі бури і борної кислоти. Паяння у вакуумі не здійснюють через випаровування цинку.

Для паяння нержавіючих сталей Cu-Zn припої не рекомендуються через утворення тріщин.

Мідно-нікелеві припої використовують для паяння нержавіючих сталей. Вони мають більшу міцність і жаростійкість (Ni = 6 – 30 %, Mn = 2 – 30 %, Si < 2 %, Cu - решта). Припої ВПр1 - ВПр-13, ПМн 10 та інш.  $t_{пл} = 950 - 1250^{\circ} \text{C}$ . Ці припої не розчинюють основний метал при тривалому нагріванні, дають щільні шви, використовують для паяння в печах.

Мідно-фосфористі припої з 4-9 % P (МФ-1, МФ-3, ПМФ-7, ПМФ-9 та ін.) відзначаються високою рідкотекучістю і відносно низькою  $t_{пл} = 700-850^{\circ} \text{C}$ . Застосовують для паяння мідних сплавів (в тому числі і латуней). Вони є самофлюсуючі і мідь можна паяти без флюсу. Однак при паянні латуней, алюмінієвої бронзи, нейзильбера і мідно-нікелевих сплавів цими припоями використовують боридні флюси.

Для паяння сталей і чавуну Cu-P припої не використовують через утворення крихких фосфидів заліза у шві. Використання бар'єрних покриттів (Ni, Cu) частково запобігає цьому. Технологічні властивості Cu-P припоїв можна поліпшити введенням до їх складу Sb, Sn, Ni, Ag.

#### 4.2 Срібні і золоті припої

Срібні і золоті припої відзначаються підвищеною тепло- і електропровідністю, пластичністю, міцністю і корозійною стійкістю, а також технологічністю. Добре змочують метали і затікають в зазори. Тому широко використовуються для паяння важконавантажених відповідальних конструкцій, вакуумної техніки та ін.

Срібні припої ПСр-15, ПСр-40, ПСр-92 містять Cu, Zn, Cd, P.

Срібні припої	ПСр-15	ПСр-40	ПСр-92
$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	810	610	900

Вони дуже технологічні. Паяння можна здійснювати усіма способами у всіх середовищах. Дають добрі результати при паянні різнорідних матеріалів з відмінними коефіцієнтами лінійного розширення.

Золоті припої (Au-Cu) відзначаються більш високою  $t^\circ$  паяння:

Au-Cu -  $t_{min} = 890^\circ\text{C}$ ; Au-Cu-Ag -  $t_{min} = 780-830^\circ\text{C}$ .

Використовують для паяння вакуумно-щільних швів, а також для паяння молібдену, графіту з металами.

Сплави Au-Ni широко застосовують в ракетобудуванні для паяння жаростійких сталей і сплавів з підвищеними механічними властивостями. Для паяння золотих виробів використовують припій, що містить 46 % Au, 18 % Zn, 3 % Si, 32 % Sb, 1 % Ni =  $590^\circ\text{C}$ . Недолік срібних і золотих припоїв – висока вартість.

#### 4.3 Нікелеві припої

Нікелеві припої системи Ni-Cu-Mn і Ni-Cr-Si-B використовують для паяння жароміцних сталей і сплавів. Мають високу температуру плавлення ( $980-1150^\circ\text{C}$ ) і міцність, але малу пластичність. Припої з бором - крихкі.

Припій Ni - P (7-11 % P) застосовують для дифузійного паяння нікелевих сплавів.

#### 4.4 Алюмінієві припої

Для паяння алюмінієвих сплавів використовують припої на основі Al (з Zn, Sn).

Найкращі корозійні властивості мають припої з 10-13 % Si ( $t_{пл} = 577^\circ \text{C}$ ). Знизити температуру паяння можна введенням міді. Припій 34А (28 % Cu, 6 % Si) має  $t_{пл} = 525^\circ \text{C}$  і широко використовується для паяння алюмінію. Для дюралів він не придатен, бо їх не можна гріти вище  $t = 505^\circ \text{C}$ . Для дюралів використовується припої з більш низькою  $t^\circ$  плавлення: В-65 з цинком системи Al-Cu-Si-Zn ( $t_{пл} = 490-500^\circ \text{C}$ ) та германієм ( $t_{пл} = 455-485^\circ \text{C}$ ).

#### 4.5 Олов'яно-свинцеві припої

Чисте олово і свинець практично не використовуються в якості припоїв через низьку межу текучості. Окрім того, олово при низьких температурах перетворюється в порошок.

Найбільше розповсюдження знайшли припої з 30-60 % Sn (ПОС 30, 40, 50, 61). Використовуються у різних галузях промисловості для паяння Fe, Ni, Cu і їх сплавів. Мають хороші технологічні властивості, пластичні.

Мінімальна  $t_{пл}$  у ПОС-61 ( $+183^\circ \text{C}$ ). У решти  $t_{пл} = 210 - 260^\circ \text{C}$ .

Введення сурми у кількості 0,5-5 % підвищує межу текучості і знижує схильність до алотропічного перетворення і старіння, однак погіршує змочуваність (ПОСу 30 - ПОССу 61).

Цинк і алюміній в кількостях  $> 0,005$  % також погіршують технологічні властивості припоїв (розтічність, схильність до утворення тріщин). Однак припої Sn-Pb з 10-40 % Zn широко застосовують для паяння алюмінію абразивним і ультразвуковим методами.

Припої на базі олова, які містять (5-8 % Al, 7-11 % Sb, решту - Cu, Sn) відзначаються високою корозійною стійкістю і використовуються для паяння проводів електрообладнання і працюють без захисту у всіх кліматичних умовах.

Використовують також свинцеві припої з добавками срібла, олова та інших елементів: ПСр 1,5; ПСр 2; ПСр 2,5; ПСр 3 (1,5-3 % Ag,



0-30 % Sn) з  $t_{пл} = 270-310^{\circ} \text{C}$ . Мають добрі технологічні властивості, однак гіршу корозійну стійкість, ніж ПОС.

#### 4.6 Індієві припої

Індієв - благородний метал з високою корозійною стійкістю, м'який, пластичний.  $t_{пл} = 155^{\circ} \text{C}$ .

Припої на його основі (27-95 % In, 0-75 % Pb, 0-25 % Cd, 0-40 % Sn) використовують у вакуумній і криогенній техніці для паяння скляних і кварцових виробів з металами, матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного розширення.

#### 4.7 Цинкові припої

Цинкові припої (Zn-Sn) використовують для паяння алюмінію і цинку. При вмісті Sn > 30 % вони відзначаються високою міцністю, хорошою пластичністю і технологічністю, однак недосить корозійностійкі  $t_{пл} = 300-420^{\circ} \text{C}$ .

#### 4.8 Титанові припої

Відзначаються підвищеною активністю і здатністю змочувати поверхню тугоплавких металів, металокераміки, металів, покритих оксидами. Використовують їх для паяння Ti, його сплавів і тугоплавких матеріалів. Виготовляють припої систем Ti-Cu, Ti-Co, Ti-Be-Zn з  $t_{пл} = 950-1025^{\circ} \text{C}$ . Припої крихкі, виготовляються у виді порошку або пасти. Паяння здійснюють у печах в інертних газах або вакуумі.

## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ І ВИРОБІВ

### 5.1 Типи паяних з'єднань

Найбільш розповсюдженими з'єднаннями листових конструкцій є внапуск, стикові і таврові (рис. 5.1).

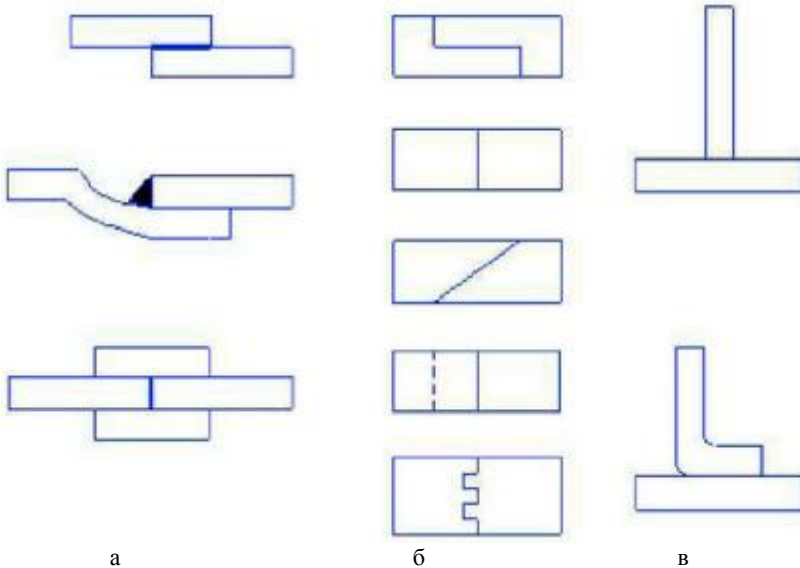


Рисунок 5.1 - Типи паяних з'єднань: внапуск (а), стикові (б) і таврові (в).

Найбільш розповсюдженим з'єднанням труб є разтрубне (рис. 5.2).

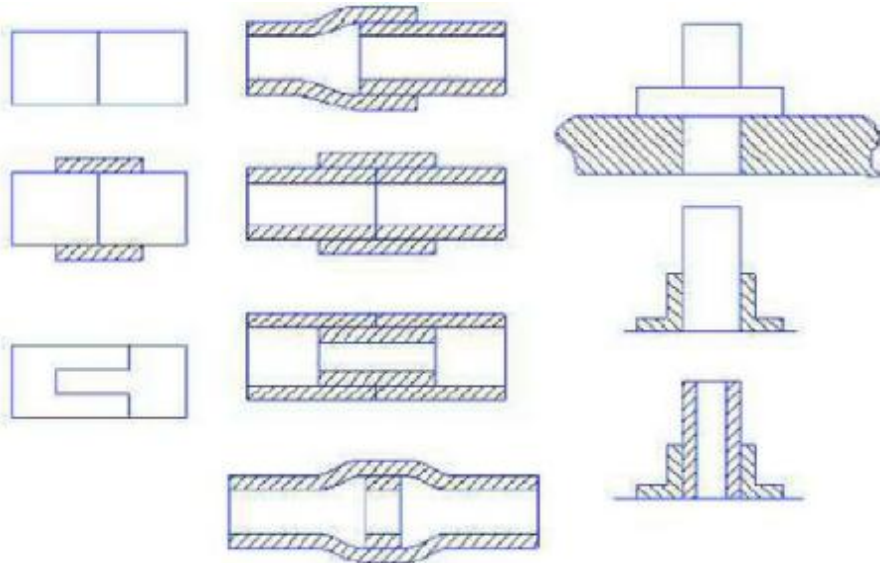


Рисунок 5.2 - Типи з'єднань стержнів і труб

Найбільш розповсюджені - внапуск. Величина напуску при паянні високотемпературними припоями складає  $(2-3)\delta$ , для низькотемпературних - до  $5\delta$ .

З'єднання криволінійних поверхонь широко використовують при виготовленні сотових і гофрованих панелей (рис. 5.3).

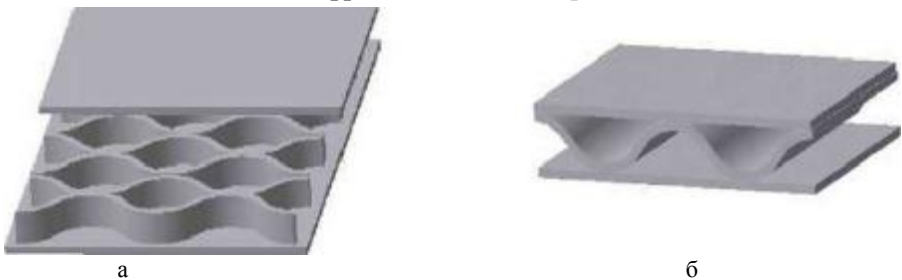


Рисунок 5.3 - Сотові (а) і гофровані (б) паяні з'єднання

## 5.2 Особливості конструювання паяних з'єднань

При конструюванні паяних виробів необхідно забезпечити:

- в з'єднаннях капілярний зазор (0,05-0,15 мм). Із збільшенням величини зазору міцність з'єднань зменшується. Це вимагає точної механічної обробки і збирання;
- можливість закріплення елементів в процесі паяння. Деякі можливі способи закріплення показані на рис. 5.4;
- запобігання чи зменшення можливих деформацій.

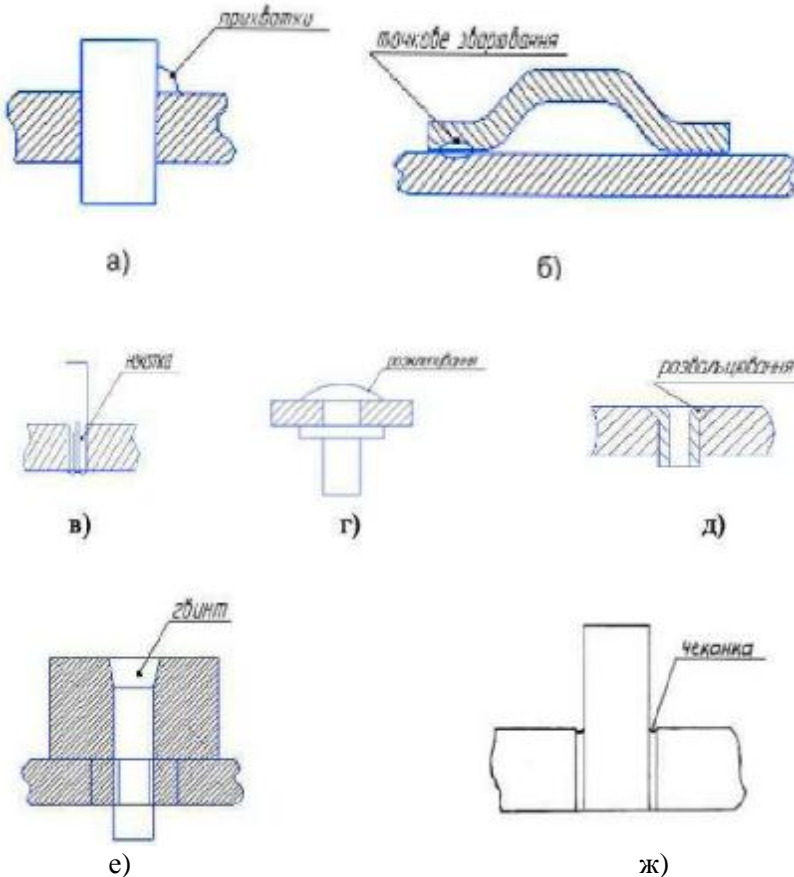


Рисунок 5.4 - Можливі способи кріплення деталей при паянні

Окремі частини паяного виробу можуть зв'язуватися ніхромовим дротом, за допомогою затискачів, підставок, зварюванням, відповідною механічною обробкою елементів.

Паяні з'єднання рекомендується розташовувати в менше навантажених місцях. Припої вибирають в залежності від основного металу, умов міцності, способу паяння і спеціальних експлуатаційних вимог до з'єднання.

При необхідності передбачають порожнини для укладання прутків, кілець чи пластинок припою.

При проектуванні з'єднань необхідно слідкувати, щоб в них не було замкнутих порожнин, де збирались би гази, що призводило б до утворення пор, раковин і непропаїв.

При паянні різномірних матеріалів враховують можливу відмінність коефіцієнтів лінійного розширення і вибирають більш пластичні припої. Для запобігання утворення при цьому крихких інтерметалідів у шві на один із матеріалів наносять бар'єрне покриття (наприклад, при паяння сталі + Ті на Ті наносять шар Мо і паяють Cu і Ag припоями).

### **5.3 Міцність паяних з'єднань**

Міцність з'єднань залежить від міцності припоїв; величини зазору; чистоти паяних поверхонь і якості їх флюсування; часу витримки при паянні, який впливає на інтенсивність розчинення основного матеріалу і можливість утворення крихких інтерметалідів і евтектик, а також проникнення припою в основний метал по границях зерен.

Міцність паяного з'єднання можна регулювати площею спаю. При проектуванні відповідальних паяних конструкцій необхідно проводити експериментальну перевірку залежності властивостей з'єднань від застосовуваних матеріалів, умов і режимів паяння.

Розрахунок паяних з'єднань і конструкцій проводять на підставі тих же припущень і розрахункових формул, що і для зварних конструкцій.

## 6 ТЕХНОЛОГІЯ ПАЯННЯ І ОБЛАДНАННЯ

### 6.1 Технологія паяння

При всіх способах паяння технологічний процес включає наступні види операцій:

- підготовка деталей до паяння;
- збирання деталей;
- паяння;
- обробка деталей після паяння.

Підготовка деталей до паяння включає очистку їх від забруднень і окисних плівок, а при необхідності і нанесення захисних покриттів.

Забруднення масного походження усувають з поверхні виробу шляхом обезжирення в водних розчинах лугів.

Сталі обезжирюють 10 % розчином NaOH при  $t = 70-80^{\circ}\text{C}$ .

Для міді використовують розчин на 1 л води: тринатрійфосфат - 50 г; сода кальцінована - 50 г; силікат натрію - 15 г  $t = 60-80^{\circ}\text{C}$ .

Іноді використовують органічні розчинники - бензин, ацетон, дихлоретан.

Дрібні деталі складної форми доцільно очищувати у ваннах ультразвуком очищенням.

Окисні плівки усувають механічними або хімічними засобами. В якості механічних засобів використовують обдувку піском, корундом чи дробом, обробку ріжучим інструментом, абразивним кругом або металевою щіткою.

Для Al, Mg, Ti кращі результати дає травлення, в масовому виробництві травлять всі метали.

Алюмінієві сплави протравлюють в 10 % розчині NaOH ( $70^{\circ}\text{C}$ ) і освітлюють 30 % розчином  $\text{HNO}_3$  або ортофосфорною кислотою.

Мідь і сталі травлять в тих же розчинах, що і перед гальванопокриттями (переважно суміш соляної і сірчаної кислоти з інгібіторами корозії).

В ряді випадків перед паянням на поверхню деталей наносять технологічні або бар'єрні покриття. Технологічні покриття з Cu, Ag, Ni ( $\delta = 5-10$  мм) наносять на поверхню металів, що важко паяються, з метою поліпшення їх змочування припоями. В процесі паяння таке покриття повинно розчинитися в припої, інакше знизиться міцність

з'єднань.

В якості бар'єрного покриття наносять метали, які запобігають утворенню крихких інтерметалідів. Бар'єрне покриття повинно добре змочуватися припоєм, але не розчинятися в ньому. В якості бар'єрного покриття, що наносять на Ті при паянні його з іншими матеріалами, використовують Мо або Nb, які не утворюють крихкі інтерметаліди ні з Ті, ні з мідними і срібними припоями.

На алюмінієві сплави наносять нікель. Покриття-припої наносять на деталі металізацією, осадженням у вакуумі або гальванічним способом.

При збиранні деталей перед паянням здійснюють фіксацію їх відносно одна одної, встановлення рівномірного зазору, нанесення флюсу і припою, приймаються міри по обмеженню розтікання припою.

Фіксація деталей здійснюється з використанням простіших пристроїв, підпорок, підставок, а також керненням, розвальцюванням, точковим зварюванням і ін. Пристрої повинні бути зручними і надійними в роботі і стійкими до умов і середовища нагрівання (не розчинятись в соляній ванні).

Для притискання тонкостінних і сотових елементів використовують тонкостінні контейнери (мішки), в яких газом створюють надлишковий тиск і стінка контейнера притискає деталь, або деталь поміщають в контейнер і у ньому створюють вакуум (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 - Схема притискання гофрованих виробів

Спосіб нанесення флюсу залежить від способу паяння. Наносять флюс переважно у виді пасти, змочуванням у водному розчині флюсу або посипанням. Кількість флюсу визначають дослідним шляхом. Внесення необхідної кількості припою здійснюється або при збиранні, або в процесі паяння.

При збиранні припій укладають у виді кілець, прокладок, втулок, покриттів. В процесі паяння його подають у виді присадного дроту, прутка, порошку, пасти, таблеток та ін. Для закріплення припою часом використовують точкове зварювання або акрилову смолу.

Обмеження розтікання припою досягається його точним дозуванням, або конструктивними рішеннями: створенням уступів,

виточок, збільшенням зазору та ін. Часом для обмеження розтікання використовують хромунання, крейдяні або вапняні покриття.

Паяння можна здійснювати різними способами в залежності від конструкції виробу, матеріалів, кількості деталей і технічного оснащення виробництва. При виготовленні невеликої кількості деталей найбільш доцільно паяти газовим пальником, при масовому виробництві - в печах, індукційним нагрівом і т.п.

Призначаючи режими паяння задають температуру і умови нагрівання, час витримки при  $t^\circ$  паяння і умови охолодження. Температура паяння звичайно на  $30-50^\circ$  С перевищує  $t_{пл}$  припою.

Якщо використовують порошкові припої, то для їх розплавлення потрібна більш висока температура через окисленість часток припою.

Швидкість нагріву визначається теплопровідністю матеріалу і товщиною стінок виробу. При малій теплопровідності і значній товщині стінок швидкість нагрівання обирають малу, щоб не було жолоблення і утворення тріщин. Витримка при температурах паяння повинна забезпечити повне розплавлення і розтікання припою і утворення галтелей, становить від декількох секунд до годин. Визначається експериментально.

Режим охолодження після паяння призначають з урахуванням можливості мінімального окислення металу виробу і запобігання руйнування припою і жолоблення виробу. Після остигання виробу усувають залишки флюсу, здійснюють зачистку поверхні припою і при необхідності термообробку виробу.

Усувають залишки флюсів промиванням у воді або в спеціальних розчинах, зачищають щіткою, струменевою обробкою.

Деталі з алюмінієвих сплавів при паянні припоєм 34А і силуміном, після промивання пасивують 5 % розчином хромового ангідриду (5-10 хв) або 5 % розчином  $HNO_3$ .

Алюмінієві деталі після паяння припоєм П575А можна анодувати або піддавати фосфатному оксидуванню.

Деталі з мідних сплавів після паяння з флюсами на основі  $ZnCl_2$  оброблюють у пасивуючому розчині: калієвий хромпик (130 г/л),  $H_2SO_4$  (80 г/л),  $NaCl$  (1 г/л), оцтова кислота (50 г/л) - ( $40-50^\circ$  С, 10-15 хв).

Залишки боридних флюсів усувають переважно механічним способом. Зі сталевих деталей, паяних срібними або  $Cu-Zn$  припоями, залишки бури можна видалити зануренням на 10-15 хв в 10 % розчин  $H_2SO_4$  з добавками 200 г/л, хромової ( $H_2CrO_4$ ) кислоти.



Залишки каніфолі не викликають корозію і їх можна не усувати. При необхідності їх усувають спиртом, бензином та іншими розчинниками.

Після усунення залишків флюсу, видаляють надлишок припою, здійснюють термообробку і рихтовку конструкції.

## **6.2 Техніка процесу паяння і обладнання для його здійснення**

Техніка виконання процесу паяння залежить від способу нагріву деталей і використовованого обладнання. Розглянемо основні способи і техніку їх виконання.

### **6.2.1 Паяння паяльником**

Використовується для низькотемпературного паяння коротких швів на тонкостінних виробах зі сталі, міді і її сплавів.

Паяльник являє собою металевий стержень, один кінець якого має форму, придатну для нагрівання виробу, інший - для поглинання теплової енергії від джерела нагріву паяльника. Паяльники підігріваються періодично по мірі їх остигання або постійно діючим джерелом тепла.

Для паяльників переважно використовують електричний нагрів, рідше - газополуменевий. Передача тепла з паяльника на виріб здійснюється швидко через шар розплавленого припою, котрий забезпечує хороший тепловий контакт. Форма робочого кінця паяльника обумовлена зручністю доступу до місця паяння. Розміри (маса) паяльника залежить від розмірів і товщини деталей. Як правило, маса  $M < 1$  кг, рідше - до 2 кг.

Виготовляють паяльники з червоної міді з низьким вмістом водню, чим менше домішок в міді, тим менше вона зношується.

Для паяння цинковими припоями в паяльниках використовують нікель і нейзильбер, які менше розчиняються цинковим припоєм. Техніка паяння: по мірі нагрівання паяльника його покривають флюсом і облуджують. Нагрівають виріб облудженим паяльником, подаючи

туди флюс і припій.

Для паяння матеріалів зі стійкою окисною плівкою (А1, металокераміка) використовують ультразвукові паяльники, у яких стержень коливається з частотою 20-55 кГц. Це сприяє кращому руйнуванню окисної плівки, для цієї мети використовують також абразивне паяння.

### **6.2.2 Паяння нагрівальними штампами, блоками, матами**

Для паяння крупногабаритних виробів складної форми з довгими швами використовуються нагрівальні штампи, блоки, мати.

Штампи мають порожнину, що відповідає формі виробу, куди його укладають разом з припоєм. Штмп з виробом нагрівають джерелом тепла (переважно в печі). При цьому забезпечується рівномірне прогрівання всіх елементів виробу, їх надійне притискання, виключається можливість жолоблення. Так паяють дві половини пропелера літака.

Блоки - це масивні акумулятори тепла, виготовлені з металу чи графіту, що передають тепло виробу. Металеві блоки нагріваються струмом високої частоти (СВЧ), графітові - за рахунок пропускання електричного струму.

Нагрівальні блоки використовуються тоді, коли безпосередній нагрів виробу СВЧ є неможливим через те, що тонкостінний виріб складної форми може розплавитися.

Для передачі тепла від джерела до виробу складної форми замість блоків складної конфігурації і великої матеріалоемності використовують нагрівальні ковдри (мати).

Мати зроблені з ніхромових стрічок, ізольованих одна від одної і навколишнього середовища м'яким ізоляційним теплостійким матеріалом (склотканина з каоліновим волокном). Нагріваються за рахунок пропускання електричного струму. Такі джерела нагріву використовують при паянні сотових панелей. При цьому виріб знаходиться в м'якому герметичному контейнері або вакуумному мішку.

### 6.2.3 Газополуменеве паяння

Місцевий підігрів деталей до температури паяння здійснюють за допомогою газополуменевих пальників - ацетиленових, пропанових, газових, водневих. Використовують для цих цілей і паяльні лампи. Паяють наступним чином. Місце спаю покривають флюсом і підігрівають до тих пір поки пруток припою при контакті з деталями почне плавитися. Процес паяння здійснюють при безперервній подачі флюсу і припою. Нагрівають в першу чергу більш масивну деталь, або з більшою теплопровідністю.

Паяння припоями, що містять цинк, здійснюють злегка окислювальним полум'ям, решту припоями - нормальним або злегка відновлювальним.

Ацетилено-кисневе полум'я взаємодіє з хлоридними флюсами, знижуючи їх активність, тому таке паяння здійснюють пропаноповітряними або бензо-повітряними пальниками. Процес газополуменевого паяння легко можна механізувати шляхом використання конвеєрних або карусельних установок.

### 6.2.4 Паяння газовим теплоносієм

Нагрівання гарячим газом без полум'я використовують для тонких немасивних виробів при паянні легкоплавкими припоями. В якості теплоносія використовують переважно повітря, а також Ar, N<sub>2</sub>, суміші газів. При використанні відновлювальних газів (H<sub>2</sub>; N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) можливе паяння без флюсу. Для нагрівання газу теплоносія використовують переважно електронагрівальні теплообмінники.

### 6.2.5 Паяння в печах

Паяння в печах найкраще втілює всі технологічні можливості і переваги процесу паяння, забезпечує стабільність якості з'єднань, можливість механізації і автоматизації процесу, високу його

економічність.

Печі бувають: електропечі опору з конвективним і інфрачервоним нагрівом, індукційні і газополуменеві. Переважно використовують електропечі опору.

Пайка в печах може здійснюватись в нейтральному, відновлювальному, повітряному середовищі або у вакуумі.

Паяння в повітряному середовищі здійснюється з використанням флюсу, який заздалегідь наносять на стик разом з припоєм. Перевагою такого способу є простота обладнання. Недолік - значне окислення матеріалу в процесі паяння.

Паяння в контрольованому середовищі (нейтральному чи активному) є найбільш розповсюдженим. При паянні в печах припій заздалегідь кладуть в зону стику у виді дроту, фольги, пасти. Процес регулюється часом витримки в печах при температурі паяння, яка перевищує  $t_{пл}$ , припою на  $50-100^{\circ}C$ . В середньому час витримки при паянні 5-10 хв.

Процес буває періодичним і безперервним. Для періодичного процесу використовують камерні печі, для безперервного - конвеєрні.

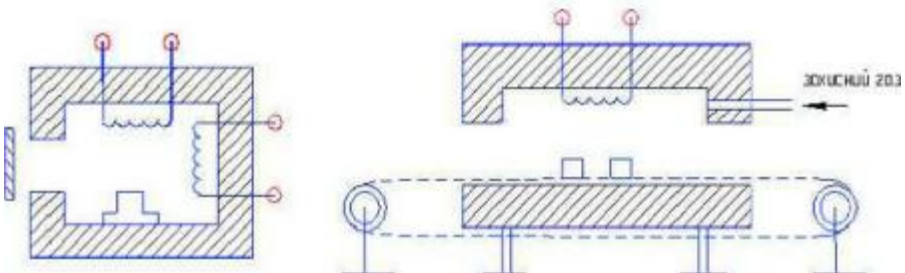


Рисунок 6.2 - Схема будови камерної (а) і конвеєрної (б) печі

Паяння у вакуумі може здійснюватись в спеціальних вакуумних печах, або в контейнерах, завантажених в звичайні печі. Недоліком нагрівання у вакуумі є відсутність конвективного теплообміну. При цьому променева енергія джерела теплоти виділяється тільки на зовнішній поверхні виробу, що збільшує тривалість нагріву. Більш глибоке розрідження необхідне для металів, що утворюють стійкі оксиди (Al, Cr, Ti). Витримка при  $t_{паяння}$  також 5-10 хв. Охолодження в печі (контейнеру) до  $t^{\circ} = 200^{\circ}C$ , а потім - на повітрі. Шви, паяні у вакуумі, відзначаються чистотою, щільністю і високою корозійною стійкістю.

Однак це малопродуктивний і високозатратний процес. Все

оснащення для паяння в печах виготовляють з матеріалів, здатних витримувати термічні цикли паяння і не вступати в контактнореактивне плавлення з паяними матеріалами і не реагувати з флюсами. Це переважно жароміцні сталі і сплави, а також графіт. При паянні Ті графіт покривають нітридом бору (0,5-2 мм) щоб запобігти реакції  $Ti + C$ . Пневматичну подушку (контейнер) для притискання деталей роблять з листової сталі.

### 6.2.6 Індукційне паяння

При індукційному паянні тепло виникає в самих деталях під дією змінного магнітного поля високої частоти. Необхідну інтенсивність і характер нагріву досягають відповідним вибором форми індуктора, частоти струму і тривалості включення. Живляться індуктори від високочастотних генераторів чи перетворювачів.

Зазори між індуктором і деталлю витримуються в межах 2-20 мм. При великих зазорах - більш рівномірний нагрів, але знижується його к.к.д. Чим краще деталь та індуктор відцентровані, тим рівномірніший нагрів. При замиканні витків на деталь можливий пропал індуктора, або оплавлення деталі. Щоб цього не було - витки індуктора захищають азбестовим шнуром з рідким склом (або лаком).

Припій на стик кладуть таким чином, щоб він не утворював замкнутий виток, бо буде швидко плавитись. Індукційний нагрів дозволяє вести паяння в газових середовищах чи вакуумі. Для цього виріб попередньо вміщують в кварцову посудину або металевий контейнер. Процес індукційного паяння легко механізується і автоматизується. Він забезпечує високу якість, продуктивність і низьку собівартість. Окислення і жолоблення деталей незначне. Недолік - висока вартість обладнання.

### 6.2.7 Паяння занурюванням

При паянні занурюванням нагрівання здійснюється в розплавах солей або припоїв. Цей спосіб є дуже продуктивний, бо нагрівання деталей відбувається дуже швидко.

Для паяння сталей використовують наступний склад розплаву солей:  $\text{BaCl}_2$  – 75 %,  $\text{NaCl}$  – 20 %, бура – 5 %. Температура розплаву на 30-50° С вище  $t_{\text{пл}}$  припою. Після паяння деталі виймають з соляної ванни, охолоджують на повітрі до 200-250° С, а потім занурюють у ванну з гарячою водою для усунення залишків солей.

Таким способом можна паяти деталі без порожнин, з яких не можна видалити залишки солей. Деталі з замкнутими порожнинами паяють попередньо помістивши їх в контейнер з контрольованою атмосферою, який потім занурюють в розплав солей таким чином, щоб його кришка була над поверхнею розплаву.

Паяння в соляних ваннах забезпечує хорошу якість паяних з'єднань, відсутність зміни хімічного складу поверхні деталей (не відбувається знеуглецювання), дозволяє точно підтримувати температуру, механізувати і автоматизувати процес.

Занурюванням в розплавлений припій паяють деталі складної конфігурації. Флюс наносять заздалегідь і деталь занурюють в припій на час, достатній для нагрівання деталей до  $t_{\text{паяння}}$  і затікання припою. Перетримувати не можна, бо розчиняється метал. Температура ванни на 50-150° С вище  $t_{\text{ліквідус}}$  припою. Маса ванни припою повинна в 20 разів перевищувати масу виробу, щоб був достатній запас тепла. Охолодження деталей - на повітрі.

Спосіб відзначається високою продуктивністю, можливістю механізації і автоматизації, хорошою якістю з'єднань. Недолік - потреба в великій кількості припою, який забруднюється. Спосіб широко використовують для паяння радіаторів, колекторів двигунів, радіотехнічних виробів.

В радіотехніці використовують також паяння хвилею припою, який фонтанує. Подача виробу до місця паяння здійснюється з таким розрахунком, щоб розплавлений припій попадав на плату в місцях виходу провідників і припаював їх.

### **6.2.8 Паяння світловим і інфрачервоним випромінюванням**

Нагрівання променевою енергією має ряд переваг:

- можливість нагрівання виробів на значній відстані від джерела енергії;

– простота дозування кількості введеної енергії; можливість здійснення процесу паяння в прозорих контейнерах з контрольованою атмосферою.

В якості джерел променевої енергії використовують потужні дугові ксенонові лампи (ДСКР 5000÷20000) або менш потужні кварцові лампи (йодидні або галогенідні). Йодидні лампи переважно випромінюють інфрачервоне випромінювання.

Оптична система нагрівача (рис. 6.3) складається з джерела випромінювання 1, відбивача 2 і лінзового конденсатора 3 (при необхідності концентрації енергії).

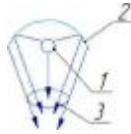


Рисунок 6.3 - Схема будови оптичного нагрівача

Припій укладають заздалегідь, або подають (механізовано) в процесі паяння. При паянні з флюсом необхідно запобігати можливості ушкодження оптичної системи нагрівача паровою або розплавом.

Паяння світловим потоком може здійснюватися з використанням флюсів, у струмені захисного газу або вакуумі.

### 6.2.9 Паяння лазерним променем

Світловий потік оптичного квантового генератора відзначається високою щільністю енергії при малій потужності. Тому він використовується для паяння мікросхем і ін. малогабаритних деталей.

За допомогою гнучких світловодів лазерний промінь можна подати в будь-яку важкодоступну точку виробу. За допомогою лінз промінь можна розділити на декілька променів, кожен з яких по гнучкому світловоду подається на свою фокусуючу лінзу і фокусується в потрібному місці, що дозволяє одночасно паяти в багатьох місцях.

Для лазерного паяння використовують Nd - лазери (СО - гірше) завдяки меншій довжині хвилі, що дає можливість краще фокусувати промінь.

Використовують для низькотемпературного паяння припоями ПОС і високотемпературного паяння срібними припоями. Товщина

матеріалів до 0,35 мм. Діаметр розфокусованого променя 0,5-3 мм.

Спосіб дорогий, але для серійних виробів перспективний через можливість автоматизації процесу.

### **6.2.10 Паяння опором**

Здійснюється за рахунок Джоулева тепла, що виділяється при проходженні струму через деталь і струмопровідні елементи. Паяння опором здійснюється на контактних машинах. Паяння здійснюється без флюсів і додаткового захисту зони завдяки швидкому нагріву, а припій захищений основним металом.

Припій наносять на зону з'єднання металізацією, гальванічним способом або у виді фольги  $\delta = 0,05-0,15$  мм. Перевагою паяння опором є висока продуктивність, хороша якість. Недолік - трудність підводу контактних затискачів (електродів) до місця паяння, особливо в деталях складної конфігурації.

Інші способи нагрівання при паянні знаходять дуже обмежене використання (електронний промінь, електролізне тепло, теплота конденсації пари) і не розглядаються у цьому курсі.

## **7 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПАЯННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **7.1 Паяння міді і її сплавів**

Окисна плівка на міді, латунях, олов'янистих бронзах і мідно-нікелевих сплавах легко відновлюється флюсами і газовими середовищами. Тому їх можна паяти усіма способами.

При паянні міді Sn-Pb-припоями та іншими легкоплавкими припоями використовують каніфоле-спиртові флюси, водні розчини  $ZnCl_2$  і  $NH_4Cl$ .

Для паяння латуней і бронз легкоплавкими припоями чистий спиртовий розчин каніфолі не використовують (бо розчиняє тільки оксиди міді), а застосовують розчин каніфолі з добавками  $ZnCd$ ,  $NH_4Cl$ , триетаноламіна.



Залишки хлоридних флюсів визивають корозію мідних сплавів і повинні ретельно усуватись.

При паянні міді і її сплавів тугоплавкими припоями на основі міді і срібла використовують флюси на основі борних з'єднань. Слід пам'ятати, що для паяння мідними припоями краще використовувати флюси системи  $B_2O_3-Na_2B_4O_7-CaF_2$  (200 і 201), а для паяння срібними припоями - високі результати дають флюси 209 і 284 системи  $KF-B_2O_3-KBF_4$ .

При паянні алюмінієвих бронз для флюсування  $Al_2O_3$  у вказані флюси додають 50 % флюсу для паяння А1, або 10-20 % кремнефтористого натрію.

Мідні сплави, леговані активними металами (Al, Be, Cr та ін.) доцільно попередньо покривати шаром Ni, Cu, Ag товщиною 5÷10 мкм. Це забезпечить добре розтікання припоїв при паянні як з використанням флюсів, так в і газових середовищах.

Високотемпературне паяння міді здійснюють Cu-Zn, Cu-P і Ag припоями; латуней - більш легкоплавкими Cu-Zn припоями (з підвищеним вмістом Zn) або срібними припоями.

Бронзи паяють Cu-Zn і Ag припоями. Мідно-нікелеві сплави паяють будь-якими припоями, в тому числі і чистою міддю.

Бронзи схильні до гарячеламкості. Тому конструкція фіксуючих пристроїв не повинна перешкоджати вільному розширенню виробів.

## 7.2 Паяння сталей

### 7.2.1 Паяння низьковуглецевих і низьколегованих сталей

Паяння низьковуглецевих і низьколегованих сталей не викликає особливих труднощів і може бути здійснене усіма відомими способами. Для високовуглецевих сталей необхідна ретельніша підготовка з'єднуваних поверхонь.

Низькотемпературне паяння маловуглецевих і низьколегованих сталей здійснюють переважно припоями ПОС (40÷61).

В якості флюсу використовують водні розчини хлористого цинку. При паянні сталей, що гартуються, з використанням ПОС, можливе виникнення тріщин під дією розплаву припою. (Чим більші внутрішні напруження і чим більше тріщин.)

Для їх запобігання деталі відпускають, використовують припої з  $\text{Sn} < 40 \%$ , збирають деталі так, щоб не виникали додаткові внутрішні напруження.

Не можна перегрівати припій, бо на межі спаю утвориться крихкий інтерметалідний прошарок  $\text{FeSn}_2$  значної товщини, що знижує міцність і збільшує пористість спаїв.

Кадмієві і цинкові припої погано розтікаються по сталях і заповнюють зазори, утворюючи маломіцні шви.

Високотемпературне паяння маловуглецевих і низьколегованих сталей здійснюють  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu-Zn}$  і  $\text{Ag}$  припоями.

Мідно-фосфористі припої не рекомендується застосовувати через утворення на межі зі сталлю крихких фосфідів заліза.

В якості флюсів при високотемпературному паянні використовують буру, флюси 200, 201, 209.

Паяння також здійснюють у відновлювальних газових середовищах:  $\text{H}_2$ , продуктах згоряння горючих газів. Оксидна плівка на маловуглецевих і низьколегованих сталях малостійка - легко розчинюється і відновлюється. Тільки, якщо в сталях є  $\text{Cr}$  і  $\text{Al}$  треба використовувати більш активні флюси.

### 7.2.2 Паяння високолегованих (нержавіючих) конструкційних сталей

В цих сталях міститься значна кількість  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$  та інших елементів, в результаті чого на поверхні утворюються більш стійкі оксидами, збагачені окислами хрому. Їх важко усунути навіть за допомогою дуже активних флюсів.

Для низькотемпературного паяння припоями ПОС використовують розчини хлористого цинку з добавками неорганічних кислот ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ , хлористого амонію, хлоридів важких металів). Найбільш активним є флюс: 2 ч – 40 % розчин  $\text{ZnCl}_2$ ; 1 ч -  $\text{HCl}$  (по об'єму).

Всі ці флюси використовують при паянні паяльником або пальником. Для паяння в печі вони малоприсадні, бо є активні тільки у виді розчинів, а в розплавленому стані не захищають і не активують поверхню нержавіючої сталі.

Для поліпшення розтікання легкоплавких припоїв на поверхню

нержавіючих сталей наносять покриття з Cu, Ni, Ag, або лудять їх.

Високотемпературне паяння нержавіючих сталей здійснюють Ag, Ni і Cu припоями. Паяння ведуть з використанням активних флюсів.

З припоями на мідній і нікелевій основі - 200, 201; зі срібними припоями - 209, 284 флюси.

У газових середовищах нержавіючі сталі паяють у відновлювальній атмосфері - переважно  $\text{BF}_3$  в суміші з інертними газами.

У вакуумі і в аргоні нержавіючі сталі погано змочуються срібними припоями. Тому доводиться наносити покриття з Cu, Ni, або використовувати срібні припої з домішками літію (ПСр72ЛМН), титану, нікелю, цирконію.

Припої срібні (окрім ПСр40) і мідні можуть викликати утворення тріщин, якщо у виробках є значні внутрішні напруження.

Припої (Cu-Ni-Si, Cu-Ni-Mn) не викликають розтріскування, але припоями з Mn не можна паяти у вакуумі через сильне випаровування.

### 7.2.3 Паяння жароміцних сталей і сплавів

Утворюють щільні плівки з оксидів Cr, Ti, Si, Al. Тому проводять ретельну механічну підготовку і використовують високоактивні флюси.

Припої - з високою температурою плавлення. Паяти краще у водневому середовищі з домішками фтористих з'єднань (1 г/л об'єму  $\text{NH}_4\text{F}$ , який розкладається на  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , HF).

Можна паяти і в нейтральних середовищах (Ar, He), але тоді під виріб насипають галоїдні солі Cr, Mn та ін., які при нагріванні утворюють випаровування, що запобігають окисленню.

При флюсовому паянні використовують флюси на основі тетраборатів. В якості припоїв використовують срібні припої, мідні (Cu-Ni, Cu-Ni-Mn) ( $t_{\text{роб}}$  до  $700^\circ\text{C}$ ) і Ni-Cr-B-Si - для більш високих  $t^\circ$ .

Низькотемпературне паяння таких сплавів рідко проводять припоями ПОС, флюс - розчин  $\text{ZnCl}_2$ .

### 7.2.4 Паяння інструментальних сталей

Можна здійснювати усіма способами тугоплавкими припоями (переважно Cu-Zn або Ag). В якості флюсу - бура, або бура з домішками FeMn, KF, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>.

### 7.3 Паяння чавуну

При паянні конструкційних чавунів виникають труднощі обумовлені наявністю в їх структурі графіту, який погіршує змочування поверхні метала припоем. Усувають графіт нагрівом в печі або окислювальним полум'ям пальника, а також дробоструменевою обробкою.

Для паяння використовують переважно мідно-цинкові припої, рідше - срібні припої і флюси - 209 і 284.

Низькотемпературне паяння здійснюють припоями ПОС, як і вуглецевих сталей.

### 7.4 Паяння нікелю і його сплавів

Нікель і його сплави системи Ni-Cu-Fe (монель і константан) можна паяти без затруднень, бо на їх поверхні утворюються нестійкі окисли.

При паянні використовують припої, флюси і газові середовища, рекомендовані для сталей і мідних сплавів.

Жаростійкі сплави (ніхроми) паяти важко через утворення на їх поверхні плівки стійких окислів Cr, Al, Si.

При паянні таких сплавів у відновлювальних середовищах останні необхідно ретельно осушувати і очищувати від залишків кисню (платиновим каталізатором).

При паянні у вакуумі і нейтральних середовищах останні необхідно осушити за допомогою цеоліту, перекису барію чи фосфорного ангідриду.

Перед паянням ніхромів покривають шаром  $Ni \delta = 7 \div 10$  мкм, який без флюсу забезпечує добре змочування у вакуумі і газових середовищах.

При паянні ніхромів жаростійкими припоями з місцевим нагрівом використовують флюси - 200, 201, а при паянні срібними припоями - 209, 284.

Переважають використовують припої системи Ni-Cr-Si-B (колмоной) і Ni-Cr-Mn-Ti. Останні дають більш пластичні шви. Захисні середовища не повинні містити сірки, бо утворюються легкоплавкі евтектики і метал стає крихким.

### 7.5 Паяння титану

На поверхні титану є шар, насичений газами, який необхідно усунути струменевою обробкою або травленням у розчині  $20 \div 30$  мл/л HF,  $30 \div 40$  мл/л HCl. За звичай, паяння ведуть у вакуумі або осушеному аргоні. При  $t = 700^\circ C$  залишки плівки розчинюються в металі, а нова не утворюється. Процес паяння ведуть при  $t = 800 \div 900^\circ C$ . При більш високих  $t^\circ$  відбувається ріст зерна.

Флюсове паяння застосовується рідше з використанням флюсів для А1. В якості припоїв частіше використовують срібні. Нікелеві і мідні, хоч і забезпечують більшу міцність, але розчиняють метал і роблять шви крихкими. Ті зі всіма металами припоїв (в тому числі і з Ag) утворює інтерметаліди.

Кращі результати дає дифузійне паяння. В цьому випадку паяння здійснюють Ni, Fe та інші металами, а витримка при температурах паяння до тих пір, поки утвориться пластичний твердий розчин.

При високотемпературному паянні Ti з іншими металами утворюються крихкі шви. Тому на титан наносять бар'єрне покриття (Mo, W).

Низькотемпературне паяння Ti припоями ПОС - рідко. Перед цим Ti покривають гальванічним способом шаром Ni, нагрівають 1 год. при  $t = 250^\circ C$ , а потім паяють, як нікель.

## 7.6 Паяння алюмінію

Основна трудність - утворення плівки  $Al_2O_3$ . Її усувати краще всього механічними способами. Тому хороші результати дає паяння тертям під шаром розплавленого припою (паяльником, скребком) абразивне і ультразвукове паяння.

Паяння - припоями ПОС. Зчеплення добре, але низька корозійна стійкість швів через велику різницю електродних потенціалів припою і основного металу.

Для паяння Al конструкцій частіше використовують припої на базі алюмінію (34A) і флюси.

Перед паянням деталі протравлюють в лугах і освітлюють  $HNO_3$ . Зазор при паянні  $0,1 \div 0,3$  мм.

Паяння пальником здійснюють з використанням бензоповітряного, газоповітряного полум'я, а не ацетилено-кисневого, бо останнє погіршує властивості флюсів і осліплює зварювальника.

В печах паяють з використанням тих же флюсів і припоїв, що і пальником. Флюс наносять заздалегідь у виді пасти на спирту. Температура паяння припоєм 34A -  $560^\circ C$ , силуміном -  $600^\circ C$ . Якщо паяють у соляних ваннах, то без  $ZnCl_2$ , щоб менше розчинявся основний метал.

Після паяння одразу промивають проточною водою і 5 % розчином хромового ангідриду ( $5 \div 10$  хв).

В газових середовищах і вакуумі практично не паяють. Застосовують контактено-реактивний спосіб. Припій - у виді фольги або покриття (Cu, Ag, Zn і ін.). Ці метали утворюють з Al евтектику і мають обмежену ділянку твердих розчинів, що дозволяє за рахунок дифузії зміцнювати паяні з'єднання.

### 7.7 Паяння металокерамічних твердих сплавів

Отримують пластини з твердого сплаву методом спікання, які припаюють до робочої поверхні ріжучого інструменту. Коефіцієнт лінійного розширення сплавів в 2÷3 рази менше, ніж у сталей. Тому вони вимагають рівномірного нагріву і охолодження і не люблять перегрів.

Перед паянням поверхню основи і пластинки обробляють механічним і абразивним способами відповідно. Флюсують боридно-фторидними флюсами (200, 201).

Припої переважно Cu - Zn, леговані Ni або Mn для підвищення теплостійкості. Часом - більш тугоплавкі Cu-Mn припої. Срібні припої дають найкращі результати, але використовуються рідко через дефіцитність.

Паяти інструмент можна різними способами, але найбільш перспективними є паяння занурюванням та індукційне, які дають можливість механізувати і автоматизувати процес паяння.

Можна здійснювати процес паяння в печі у відновлювальній атмосфері. При цьому W-Co пластини зі сталлю паяють без флюсу, а Ti-Co - обов'язково з флюсом.

### 7.8 Паяння металів з неметалами

За допомогою паяння можна з'єднувати метали зі склом, кварцом, фарфором, керамікою, графітом, напівпровідниками і ін. Існує 3 різновидності процесів отримання паяних з'єднань між металами і неметалами:

- шляхом введення між металами і неметалами в процесі паяння припою;

- паяне з'єднання утворюється з використанням припоїв між металом і неметалом, на поверхню якого попередньо було нанесене металічне покриття;

- утворення з'єднань між металами і неметалами за допомогою легкоплавкого скла, емалі, глазури.

З'єднання металів з неметалами з використанням металевих

сполучень здійснюють срібними припоями, що містять велику кількість титану і цирконію (25÷50 %), котрі здатні змочувати як поверхню металів, так і неметалів. Такими припоями паяють високоглиноземну кераміку і кварц з титаном або залізо-нікель-кобальтовими сплавами. При паянні кварцу ускладнення виникають через велику різницю коефіцієнтів лінійного розширення кварцу і металу (в 5÷7 разів).

Паяння графіту з металами також здійснюють припоями з Ti і Zr, які є добрими карбидоутворювачами і гарно змочують графіт.

Недолік цирконієвих і титанових припоїв - низька корозійна стійкість в розплавах солей, в яких доводиться загалом працювати неметалевим виробам.

Кращу корозійну стійкість при паянні графіту забезпечує припій 35 % Au, 35 % Ni, 30 % Mo.

Друга група технологічних процесів ґрунтується на попередньому нанесенні на неметал металевої плівки. В цьому випадку на поверхню скла, кераміки методом впалювання, металізації, відновленням оксидів або іншими методами наносять шар металу. Після цього здійснюють паяння як металічних матеріалів.

Процес впалювання плівки в скло роблять наступним чином. Поверхню скла покривають суспензією порошку металу або його з'єднань (наприклад,  $Ag_2O$ ) і нагрівають до отримання міцно зчепленої металевої плівки.

Вироби з такою плівкою паяють припоями ПОС з водним розчином  $ZnCl_2$ . При високотемпературному паянні використовують Ag і Cu - припої. При цьому слід запобігати перегріванню, щоб металева плівка не розчинялася в припої.

Інший метод полягає в тому, що метал попередньо покривають більш легкоплавким склом, або емаллями, які потім сплавляють з відповідними неметалевими матеріалами. При такому методі в з'єднаннях утворюються менші напруження і відповідно менша ймовірність утворення тріщин.



## 8 ДЕФЕКТИ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ І ВИРОБІВ

Дефекти, що утворюються при виготовленні паяних конструкцій, можна розділити на дефекти форми і розмірів з'єднань і конструкції в цілому, а також внутрішні дефекти паяних швів.

Дефекти форми і розмірів з'єднань обумовлені якістю виготовлення заготовок і точністю їх збирання і фіксації. Найбільш характерними видами таких дефектів є зміщення елементів і нерівномірна величина зазору.

Контроль заготовок і збирання під пайку здійснюється зовнішнім оглядом і перевіркою всіх розмірів мірним інструментом.

Дефекти форми і розмірів виробу в цілому (деформації і жолоблення) обумовлені неякісним збиранням елементів, а також нерівномірним нагрівом і охолодженням в процесі паяння.

Для їх запобігання необхідне ретельне дотримання технології, надійна фіксація деталей, рівномірний нагрів і повільне охолодження.

До внутрішніх дефектів паяних швів відносяться:

- відсутність зчеплення припою з поверхнею металу;
- непропай (неповне заповнення зазору припоєм);
- пори, усадні рихлоти;
- тріщини;
- шлакові і флюсові включення.

Відсутність зчеплення припою з паяною поверхнею обумовлено неякісною підготовкою поверхонь і поганим їх флюсуванням, недостатнім прогрівом паяних деталей і неправильною технікою паяння.

Непропай також обумовлений незмочуванням основного металу припоєм, або поганою рідкотекучістю припоїв через їх забруднення. Мілкі непропаї можуть бути викликані тими ж причинами, що й пори. Пори утворюються через виділення в процесі паяння газів, що містяться в припої і утворюються при випаровуванні окремих компонентів припою і флюсу.

Сприяє утворенню пор і непропаїв наявність вологи у флюсі і на поверхні припою. Так прожарювання прутків А1 припоїв при 350° С знижує пористість швів у 2 рази.

Усадні рихлоти утворюються при зазорах і великій кількості

припою в зоні з'єднання.

Тріщини при паянні, як і при зварюванні, бувають гарячі і холодні і розташовуються в шві, зоні з'єднання і в основному металі. До утворення тріщин у шві схильні припої з широким інтервалом кристалізації, а також малопластичні забруднені домішками паяні шви. Тріщини в основному металі переважно виникають під дією внутрішніх напружень, що утворюються при збиранні, нагріві і охолодженні деталей. Вони можуть виникнути також в результаті проникнення розплавленого припою по границях зерен основного металу. Це ослаблює зв'язок між зернами і під дією внутрішніх напружень призводить до виникнення тріщин. Тріщини по зоні з'єднання припою з металом можуть виникнути при паянні різнорідних матеріалів з відмінними фізико-механічними властивостями. Часто вони утворюються при паянні твердих сплавів зі сталями, а також при паянні нержавіючих сталей мідними і срібними припоями, якщо у виробі діють великі напруження. Виявляють внутрішні дефекти тими ж методами, що і в зварних швах.

## ВИСНОВКИ

В даному курсі розглянуті найбільш розповсюджені способи і технологічні процеси паяння. Вибір конкретного способу залежить від технічних вимог до якості паяних з'єднань, наявності матеріалів і обладнання для здійснення відповідних технологічних процесів, а також техніко-економічних затрат на їх виконання.

Завдяки багатьом перевагам використання процесів паяння є доцільним в різних галузях промисловості, особливо в умовах масового виробництва деталей малих і середніх розмірів.

При цьому інтенсивно розвиваються також способи їх механізації і автоматизації, що в недалекому майбутньому зробить паяння одним із найбільш розповсюджених процесів з'єднання деталей і заготовок із різноманітних матеріалів.